

# Üvegszálás hőszigetelő anyagok, tendenciák, kapcsolatok, összefüggések

Szemán József

jszeman@freemail.hu

## Glass fiber insulation, trends, relationships, connections

This report shows the connection of heat conductivity with the typical heat flows and the product parameters of the fiberglass heat

insulation products. It is examined how to increase the quantity of lambda value: cutting density and making thinner fiber diameter. Author researches connections among the fiber diameter and glass oxides and analyses this effects.

## A hővezetés alaptörvénye

Fourier (1822) törvénye szerint egy homogén testben a hőáram a csökkenő hőmérsékletek irányába mutat, arányos a terjedési irányú, hosszegységenkénti hőmérséklet-változással és az erre az irányra merőleges keresztmetszettel:

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot dt/dx$$

$Q$  a hőáram, az  $F$  felületen időegységenként átáramlott energia, W;

$\lambda$  a hővezetési tényező, az adott test anyagjellemzője, W/(m · K);

$F$  a hővezető keresztmetszet, m<sup>2</sup>;

$dt/dx$  a hőmérséklet-eloszlás hely szerinti differenciálhányadosa, azaz a hosszegységenkénti hőmérséklet-változás, K/m.

A Fourier-törvényben a hővezetési tényező az anyag fizikai jellemzője, és azt fejezi ki, hogy mekkora a hőáram-sűrűség 1 K/m hosszegységenkénti hőmérséklet-változás esetén, azaz a hővezetési tényező számértéke az adott anyag szerkezetétől és termodinamikai állapotától függ.

1. táblázat

Az építőiparban gyakran használt néhány anyag jellemzője  
Some parameters of often used building material

Anyag	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ , W/(m·K)
Acél	7850	58,1
Bazalt	2800	3,5
Vasbeton	2400	1,55
Cementvakolat	1800	0,93
Kisméretű tömör égetett agyagtégla	1700	0,78
Soklyukú égetett agyagtégla	1280	0,5
Faforgácslap	650	0,16
Gázszilikát	550	0,22
Kőzetgyapottermék	150	0,044
Üveggyapot	20	0,032

A hőszigetelő anyagok természetes vagy gyakrabban mesterséges anyagokból gyártott, nagy pórustérfogatú, kis testsűrűségű, üreges vagy szálás szerkezetű termékek, amelyeket szilárd váz és levegővel vagy más gázokkal telített pórusok és kapillárisok rendszere alkot. Hőszigetelő anyagoknak azokat az anyagokat tekintjük, amelyek hővezetési tényezője kisebb 0,15 W/(m · K) értéknél.

Az 1. táblázat az építőiparban gyakran használt néhány anyag jellemzőjét mutatja.

## Fontosabb hőszigetelő anyagok

### Természetes alapanyagú hőszigetelő anyagok

#### Szilikátszálás hőszigetelő anyagok

**Kőzetgyapot.** Főként vulkanikus és üledékes kőzetek (pl. bazalt, diabáz, mészkő) keverékének olvadékból előállított, üveges szerkezetű szálakból, hőre keményedő kötőgyantával előállított termék. Testsűrűsége 40–220 kg/m<sup>3</sup> közötti, hővezetési tényezője 0,032–0,042 W/(m · K).

**Üveggyapot.** Jó minőségű, finomra őrölt üvegnyersanyagok (pl. homok, földpát, szóda, nátrium-szulfát, egyéb adalékok) homogén keverékének olvasztásával és szálazásával előállított, üveges szerkezetű szálakból hőre keményedő műgyantakötéssel gyártott termék. Testsűrűsége 10–110 kg/m<sup>3</sup> közötti, hővezetési tényezője 0,031–0,04 W/(m · K) értékek között van általában.

#### Szemcsés hőszigetelő anyagok (duzzasztott perlit)

A perlit kötött vizet tartalmazó, túlnyomórészt üveges fázisú, savanyú vulkáni kőzet, amely meghatározott hőmérsékleten, gyors hevítés hatására eredeti térfogatának többszörösére duzzad. A duzzadás következtében légzárványokat tartalmazó szemcsék keletkeznek. Halmazsűrűsége 100–200 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényezője 0,045–0,065 W/(m · K).

## Hőszigetelő habarcsok, vakolatok

A hőszigetelő habarcsok duzzasztott perlitből különböző kötőanyagok (cement, mészhidrát, gipsz stb.), valamint habosító és egyéb adalékszerek hozzáadásával előállított száraz keverékek. A felhasználás során víz adagolásával és keveréssel kell homogenizálni. Testsűrűségük kb. 450–550 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényezőjük 0,1–0,18 W/(m · K).

## Növényi alapanyagokból készített hőszigetelő anyagok

Különböző növényi rostokból, őrleményekből, forgácsokból kötőanyagokkal vagy anélkül, hőkezeléssel és préseléssel előállított termékek.

## Mesterséges alapanyagú hőszigetelő anyagok

### Polisztirolhabok

Az expandált polisztirolhabok (EPS) alapanyaga a kőolajból előállított, hajtógázt és speciális adalékokat tartalmazó „sztirolgyöngy”. A gyöngyöket szakaszos gőzöléssel duzzasztva sablonban tömbökké formázzák, és a kívánt méretre vágják. Az EPS-habok testsűrűsége 10–35 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényezőjük 0,035–0,045 W/(m · K). Az extrudált polisztirolhabokat (XPS) speciális granulátumból készítik. A gyártás széles résű extruderben történik, a habosító adalék hatására az adott méretnek megfelelően habosodnak. Testsűrűségük 25–45 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényezőjük 0,028–0,032 W/(m · K).

### Polietilén hőszigetelő anyagok (PE-habok)

Kémiai úton habosítással előállított, zárt sejt szerkezetű lágyhab-termékek. Testsűrűségük 25–180 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényezőjük 0,037–0,065 W/(m · K).

## Szilikátbázisú szálás szigetelőanyagok

A dolgozatban a szilikátbázisú, szálás szigetelőanyagoknál fellelhető tendenciákkal, kapcsolatokkal, összefüggésekkel foglalkozom.

A hő- és hangszigetelésre használt szálás szigetelőanyagokat a XIX. század végétől állítják elő ipari méretekben. Kezdetben a nagy testsűrűségű, 10–20 µm szálátmérőjű salakgyapotot (angyalhaj) a különböző ipari berendezések, kemencék, kazánok és más hőhasznosítók energiatakarékos működtetése tette szükségessé. Az 1960-as évek közepéig a salakgyapot és a Hager-eljárással gyártott üvegyapot volt a jellemző. A gyártástechnológia fejlődésével a testsűrűség csökkenése és a 3–10 µm szálátmérőjű termékgyártás vált jellemzővé.

### A szálás szigetelőanyagok gyártása

Az olvasztásra kerülő, általában üvegipari nyersanyagok: üvegcserep, mész, homok, dolomit, nátrium-karbonát,

földpát, bórax, szulfátok, foszfátok stb. keverékét egy adagoló juttat az üvegelosztó kemencébe. Az olvasztókemence gáz-, olaj- vagy villamos fűtésű. A szálképzést szálázócentrifuga végzi. Az adagolócsatornából kilépő folyékony üveg egy kifolyón keresztül jut a forgó centrifugába. A centrifugális erő hatására a palást felületén lévő több ezer furaton keresztül képződik a néhány mikron átmérőjű üvegszál. A kész üvegszálat ventilátorok segítségével az ülepítőkamrában egy speciális szalagra viszik, közben a szálat hőre keményedő gyanta kötőanyaggal permetezik be, majd a polimerizációs kemencébe továbbítják. A gyanta biztosítja a szálak egymáshoz való tapadását. A polimerizációs kemencében a beporlasztott kötőanyaggal ellátott szálhalmazt a terméktípus szerinti testsűrűségnek megfelelő vastagságúra nyomják össze, és hőkezeléssel a kötőanyagot kikeményítik, majd méretre vágják és csomagolják.

## A szálás szigetelőanyagok fontosabb termékjellemzői

Hővezetési tényező ( $\lambda$ ), W/(m · K). Az anyag hővezető képességét jellemzi 10 °C-on (minél kisebb az érték, annál jobb). Az érték nedvességfelvétel hatására romlik (bővebben: *Wojnárovitsné*: Bazalt és üvegyapot víz és hő hatására lejátszódó korróziójának jellemzői. Bp., Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet, 1988).

Testsűrűség ( $r$ ), kg/m<sup>3</sup>. Az anyagok egy m<sup>3</sup>-nyi mennyiségének súlya.

Nedvességfelvétel ( $wn$ ), m%. Az anyagok pórusaiba meghatározott körülmények között felvett nedvességmutatató száma a térfogat %-ában (minél kisebb az érték, annál jobb).

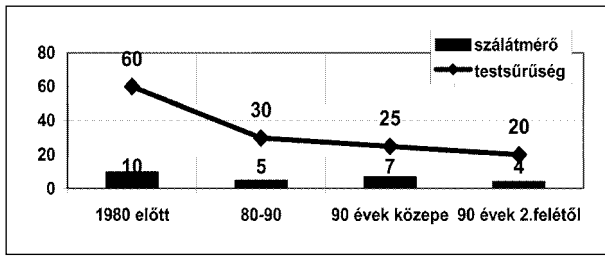
Hőállóság, °C. Azon hőmérsékleti határ, ameddig az anyag eredeti tulajdonságait megtartja (minél nagyobb az érték, annál jobb).

## A szálás szigetelőanyagok fontosabb trendjei

Az utóbbi évtizedek tendenciáit figyelembe véve a jó hőszigetelő kategóriába tartozó 0,05 W/(m · K) alatti hővezető képességű, szilikátbázisú, szálás szigetelőanyagok jellemző trendjei (1. ábra):

1980 előtt:	testsűrűség > 60 kg/m <sup>3</sup> , szálátmérő > 10 µm;
1980-90-es évek:	testsűrűség < 30 kg/m <sup>3</sup> , szálátmérő < 5 µm;
1990-es évek közepe:	testsűrűség > 25 kg/m <sup>3</sup> , szálátmérő > 7 µm;
1990-es évek II. felétől:	testsűrűség < 20 kg/m <sup>3</sup> , szálátmérő << 5 µm.

A tendenciákból egyértelműen kiolvasható a gyártási testsűrűség csökkenése és a szálátmérő vékonyodása. Ez a gyártástechnológiák fejlődésével, illetve az alapanyag- és energiaárak emelkedéséből következő anyagtakarékosabb technikák térhódításával magyarázható. Szembetűnő azonban a 90-es évek közepét jellemző, a korábbinál vastagabb szálátmérő alkalmazása. Ehhez az időszakhoz kapcsolódik



1. ábra. Trendek a szálás hőszigetelő anyagoknál  
Trends of the heat insulation material

a szálás hőszigetelő anyagok gyártása, feldolgozása során a szervezetbe jutó szilikátszálak tumoros hatásának intenzív vizsgálata a német TRGS 905, 1994 alapján.

Erre a veszélyre a gyártók a szálak oxidos összetételének olyan változtatását végezték el, hogy azok a testnedvekben tumor okozása nélkül mielőbb lebomolhassanak, feloldódhassanak. Jellemző volt ekkor a csomagoláson is feltüntetett + KI 40 felirat.

A KI (calcinogen index) értékét az oxidos összetétel alapján (alkotó oxidok tömegszázalékban) a következőképpen kapjuk meg:

$$KI = Na_2O + K_2O + CaO + MgO + BaO + B_2O_3 - 2 \cdot Al_2O_3, m\%$$

Különböző irodalmi források arra utaltak, hogy  $KI > 40$  érték esetén nincs statisztikailag bizonyított rákkeltő hatása a szálaknak (Environmental Health Perspectives 105, Supplement 5, September 1997).

A sok, esetenként egymásnak ellentmondó változás tisztázására elemeztem a szálás szigetelőanyagok hőszigetelő képességét befolyásoló jellemzőket, azok egymásra hatását és a köztük fellelhető kapcsolatokat. A munkámhoz az elmúlt 2 évtized hazai piacán megjelent szigetelőanyaggyártók beszerezhető termékeit használtam fel. Meghatároztuk a termékek hővezető képességét, testsűrűségét, az elemi szálak átmérőit, a szálakból beolvasztott üveg oxidos összetételét és a viszkozitását.

## A szálás hőszigetelő anyagok hővezetésének modellezése

A szálás hőszigetelő anyagok különböző testsűrűségű elemi szilikátszálak olyan halmazai, amelyekben a szálak viszonylag rendezetlenül helyezkednek el, és az állagtartásukat a különböző, de általában műgyantaalapú kötőanyag biztosítja.

### Lehetséges hőáramok a szigetelőanyagban

Vezetés:

- vezetés az elemi szálakban, üvegben ( $Q_{vs}$ );
- vezetés a szálak közötti légtérben, levegőben ( $Q_{vl}$ ).

A hő az anyagban részecskéről részecskére terjed, a melegebb részekről a hidegebbek felé.

**Áramlás.** A hőáramlás (konvekció) során a hőt a mozgó térfogatelemek (levegő, gázok, folyadékok) közvetítik. Esetünkben a hőmérséklet-különbség hatására létrejövő „kéményhatás” okozza az áramlásos hőáramot ( $Q_k$ ).

**Sugárzás.** Hősugárzás esetén a hő elektromágneses hullámok alakjában terjed, és a melegebb testről a sugarakat el nem nyelő közegeken keresztül jut a hidegebb testre. A szilárd anyagrészeket elválasztó levegő eközben rendszerint nem melegszik fel, tehát nincs közvetítő közeg.

Hősugárzással terjednek a napsugarak és részben a fűtőtestek hője. A felületek hőmérsékletüktől és minőségüktől függően állandóan sugároznak ki és nyelnek el hősugarakat, a fényes, csiszolt felületek hőelnyelő képessége kicsi.

Az összes hőáram tehát:

$$Q_{\sigma} = Q_{vs} + Q_{vl} + Q_k + Q_r$$

alakban írható fel.

Várható kapcsolatok a termékjellemzőkkel:

- az elemi szálakban létrejövő hővezetés  $Q_{vs}$  arányos a szálak tömegével, azaz a testsűrűséggel;
- a szálak közötti térben nyugvó levegő hővezetése  $Q_{vl}$  várhatóan konstans  $0,024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  nagyságú;
- a szálak közötti térben elmozdulásra képes levegő hővezetése  $Q_k$  arányos a levegő mennyiségével, azaz fordítottan arányos a testsűrűséggel;
- a sugárzás okozta hővezetést  $Q_r$  a tükröként viselkedő szálfelület megakadályozza, tehát várhatóan az összes szálfelülettel fordítottan arányos.

A hővezetést leíró függvényt célszerűen a következő alakban kell keresni:

$$\lambda = K + A \cdot \text{sűrűség} + B \cdot 1/\text{sűrűség} + C \cdot 1/\text{össz-szálfelület}$$

Az összes szálfelület meghatározása, ahol:

$s$  = testsűrűség,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$d$  = szálátmérő,  $\mu\text{m}$ ,

$h$  = az  $1 \text{ m}^3$  szigetelőanyagban levő szál hossza,  $\text{m}$ ,

$V$  = az  $1 \text{ m}^3$  szigetelőanyagban levő szál térfogata,  $\text{m}^3$ ,

$F$  = az  $1 \text{ m}^3$  szigetelőanyagban levő szál felülete,  $\text{m}^2$ ,

$\rho$  = a szálanyag (üveg) fajsúlya,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Így:

$$F = h \cdot d \cdot \pi$$

$$h = V/(d^2 \cdot \pi/4)$$

$$V = s/\rho \text{ és } V = h \cdot d^2 \cdot \pi/4$$

Ezek visszahelyettesítésével:

$$F \Rightarrow s/d, \text{ illetve } 1/F \Rightarrow d/s$$

A levezetett megfontolások alapján kiválasztott változók hatáserősségét korrelációs analízis felhasználásával

is minősítettük. A feldolgozáshoz 646 db összetartozó, 40 kg/m<sup>3</sup> alatti testsűrűségű mérést dolgoztunk fel az EXCEL programcsomaggal és a 0,7-nél nagyobb korrelációs együttható négyzetértéket tekintettük szignifikánsnak. A kapott eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

**Hőáramok szignifikanciája**  
Significant level of heat flow

Hőáram fajtája	Változó	r <sup>2</sup>	Megjegyzés
Konvekció	1/sűrűség	0,944	szignifikáns
Vezetés	sűrűség	0,757	szignifikáns
Sugárzás	d/sűrűség	0,761	szignifikáns
Nem magyarázott	?	0,077	nem szignifikáns

A kapcsolatok erőssége alapján megállapítható, hogy a feltételezett változók mind erősen meghatározók, szignifikánsak.

A leíró egyenlet meghatározásához több gyártó termékeinek mért értékeit használtuk fel. Így az összefüggés általános tendenciákat tartalmaz, és nem alkalmas egy konkrét termék elbírálásához, mivel a gyártók más-más olvasztási, szálképzési és egyéb gyártási technológiákat alkalmaznak.

**A leíró összefüggés**

$\lambda, \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 24,0135 + 0,031822 \cdot \text{sűrűség} + 5,41626 \cdot 1/\text{sűrűség} + 32,44095 \cdot d/\text{sűrűség}$   
a közelítés erőssége, r<sup>2</sup> = 0,90184, azaz határozottan jó a függvénykapcsolat, a közelítés hibája 1,8 mW/(m · K).

A szálak között nyugvó levegő hővezetése a várt 24 mW/(m · K) értékhez közeli 24,0135 mW/(m · K) lett.

Kiolvasható kapcsolatok:

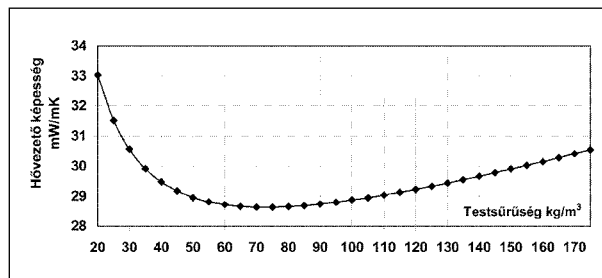
- a konvenció hőáramot okozó rész, a szálak között elmozdulni képes levegő az alacsony testsűrűség tartományában jelentős;
- a szálakban létrejövő vezetés a magasabb testsűrűségnél lesz meghatározó;
- a sugárzásos hővezetés a kisebb testsűrűségnél és a magasabb szálátmérőnél eredményez nagyobb értéket.

A testsűrűség és a szálátmérő együttes hatását jól mutatja a leíró függvény további vizsgálata. A görbe általános alakja: meredeken csökken, minimummal rendelkezik, és kevésbé meredeken emelkedik a hővezető képesség a testsűrűség függvényében (2. ábra).

A számított minimumpont helyét a szálátmérő erősen befolyásolja, ezt a 3. táblázat és 3. ábra mutatja:

A minimumpontok széles tartománya is azt sugallja, hogy a testsűrűség jelentősen csökkenthető kisebb szálátmérő alkalmazásakor, ami összhangban van a korábban bemutatott trend tendenciájával.

Nagyon tanulságos a következő összehasonlítás, ahol azt vizsgáltam, hogy 5, illetve 6 μm szálátmérővel

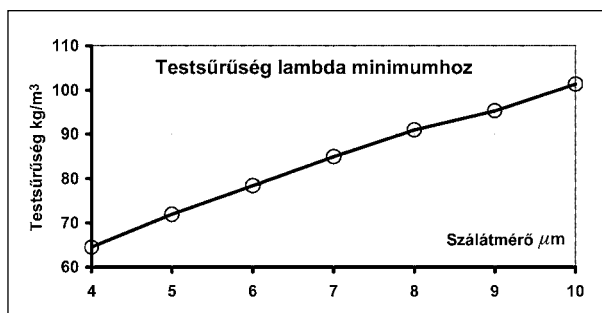


2. ábra. A hővezető képesség és testsűrűség függése 5 μm szálátmérőnél  
Dependent of heat conductivity by the density at 5 μm fiber diameter

3. táblázat

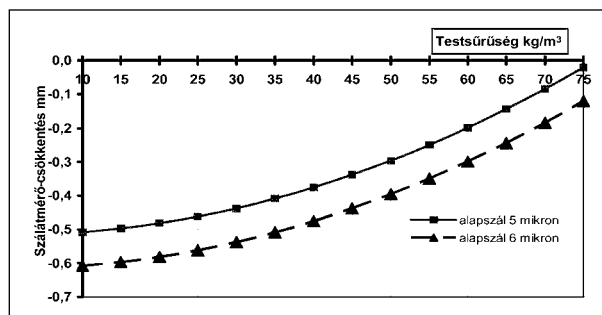
**A hővezető képesség-minimum és szálátmérő függése**  
Dependent of heat conductivity by the fiber diameter

Szálátmérő, μm	Testsűrűség, kg/m³ λ minimumhoz
4	65
5	72
6	78
7	85
8	91
9	95
10	101



3. ábra. A hővezető képesség-minimum és szálátmérő függése  
Dependent of heat conductivity by the fiber diameter

meghatározott hővezető képesség elérhető-e úgy, hogy a testsűrűséget 10%-kal csökkentjük, és a szálátmérőt a szükséges mértékben alacsonyabb értékre állítjuk be (4. ábra).



4. ábra. Azonos hővezető képességhez szükséges szálátmérő-csökkenés 10% testsűrűség-redukciónál  
Fiber diameter reduction to get same heat conductivity using 10% density cut

A két görbe párhuzamos lefutású, és az alacsonyabb testsűrűségeknél csak nagyobb mértékű szálátmérő-csökkenéssel érhető el a kiindulási hővezető képesség.

A korábban bemutatott tendenciák alapján felmerül a kérdés, hogy a 90-es évek közepén gyártott magasabb szálátmérő és a KI 40 elv alapján változtatott oxidos üvegösszetétel mennyire van kapcsolatban egymással?

## A fellelhető tendenciák, összefüggések meghatározása

A nem homogén, több gyártótól származó minták mérési eredményei alapján a különböző üvegalkotó oxidok (m%) függvényében ábrázoltam a szálátmérőt, és a kapott diagramokat elemeztem.

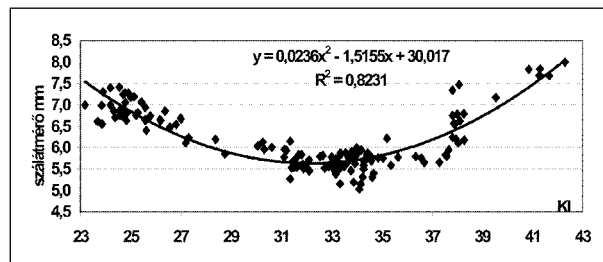
Első közelítésben közel véletlenszerű ábrákat kaptam, és ezekből tendenciát alig lehetett kiolvasni. A trendelemzés egyik elfogadott és gyakran alkalmazott módszere a mozgó átlagok alkalmazása a fő irányzatok meghatározására, az ingadozások lefedésére. Bár a mozgó átlagok módszerét az időbeni trendek kiszűréséhez használják, a vizsgálataim alapján megállapítható, hogy a nem időfüggő adatok elemzésénél is jól kiszűrhető tendenciák állapíthatók meg vele. A munkám során  $n = 3 \dots 50$  elemű mozgó átlagokat számoltam és ábrázoltam. A feldolgozások közül az  $n = 17$  elemű mozgó átlagok mutatták a legjobb kapcsolatot az oxidos összetételek és a szálátmérő között, ezért ezeket ismertetem.

A 4. táblázat a vizsgált szálak oxidos összetételét mutatja tömegszázalékban.

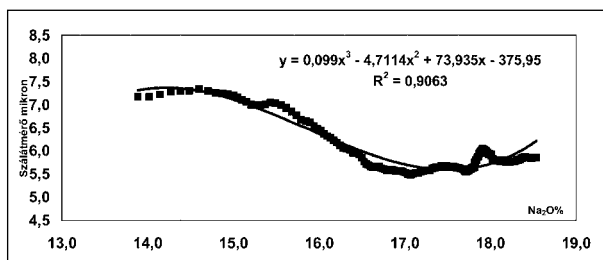
A KI érték és a szálátmérő kapcsolata (5. ábra). A KI érték a  $\text{SiO}_2$  kivételével minden alkotó oxidot tartalmaz, így nem feltűnő a pontok jól követhető tendenciája. Alacsony és magas KI értéknél nagyobb szálátmérőértékek találhatók, és  $\text{KI} = 31\text{--}33$  tartományban minimuma van a görbének. A pontokat másodfokú polinommal közelítettem, és ez erős tendenciát mutat  $r^2 = 0,8231$  értékkel.

Jogosan vetődik fel a következő kérdés: az alkotó oxidok közül melyik, milyen mértékben és milyen irányban befolyásolja a szálátmérőt? Mivel egyedi minták mérésein alapulnak a megfigyelések, ezért csak az adott komponens hatása vizsgálható, a többi alkotó nagyságára nem tudunk következtetni.

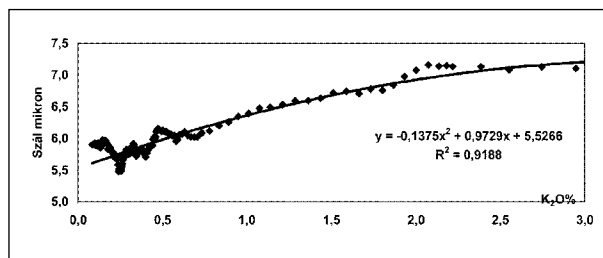
A  $\text{Na}_2\text{O}$  és a szálátmérő kapcsolata (6. ábra). A  $\text{Na}_2\text{O}$  a vizsgált tartományban eleinte magas, majd folyamatosan csökkenő, majd állandósuló alacsony szálátmérőt ered-



5. ábra. A KI érték és a szálátmérő kapcsolata  
Fiber diameter versus KI value



6. ábra.  $\text{Na}_2\text{O}$  és a szálátmérő kapcsolata  
Fiber diameter versus  $\text{Na}_2\text{O}$  value



7. ábra.  $\text{K}_2\text{O}$  és a szálátmérő kapcsolata  
 $\text{K}_2\text{O}$  value fiber diameter

ményez. A vizsgált pontok harmadfokú polinommal jól közelíthetők,  $r^2 = 0,9063$  értékkel.

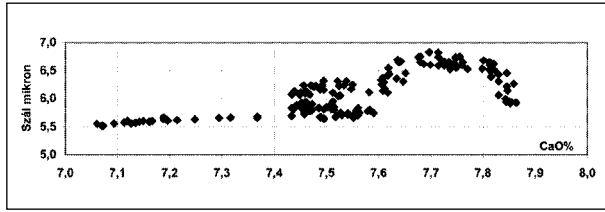
A  $\text{K}_2\text{O}$  és a szálátmérő kapcsolata (7. ábra). A  $\text{K}_2\text{O}$  a vizsgált tartományban folyamatosan emelkedő, majd állandó magas szálátmérőt eredményez. A vizsgált pontok másodfokú polinommal jól közelíthetők,  $r^2 = 0,9188$  értékkel.

A  $\text{CaO}$  és a szálátmérő kapcsolata (8. ábra). A  $\text{CaO}$  és a szálátmérő között a korábbiakhoz képest kevesebb tendencia fedezhető fel. A 7,0–7,4%  $\text{CaO}$  tartományban kissé emelkedő, majd a 7,4%  $\text{CaO}$  fölötti részben már kevés trend olvasható le, csupán a magasabb és inhomogénebb szálméret állapítható meg.

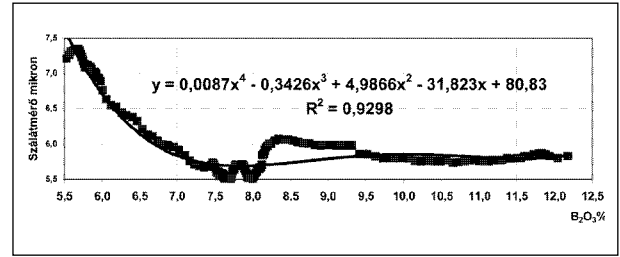
4. táblázat

### Oxidok összetétel Oxide composition

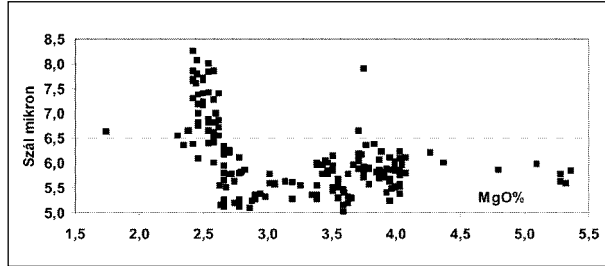
Oxid	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	KI
Átlag	16,96	0,79	7,55	3,31	2,33	8,22	60,72	0,064	32,18
Minimum	11,68	0,02	5,99	1,74	0,77	4,61	52,98	0,024	23,19
Maximum	19,67	7,55	8,66	5,36	4,34	14,32	65,57	0,28	43,28



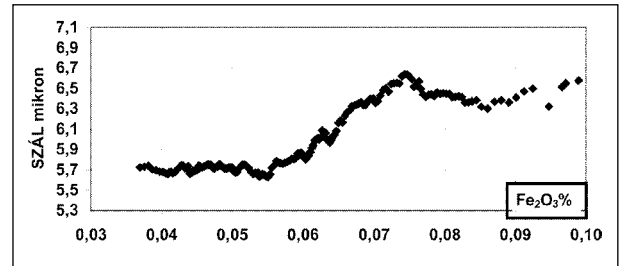
8. ábra. CaO és a szálátmérő kapcsolata  
CaO value fiber diameter



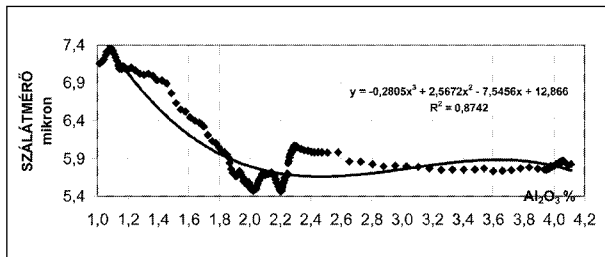
11. ábra. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata  
B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> value fiber diameter



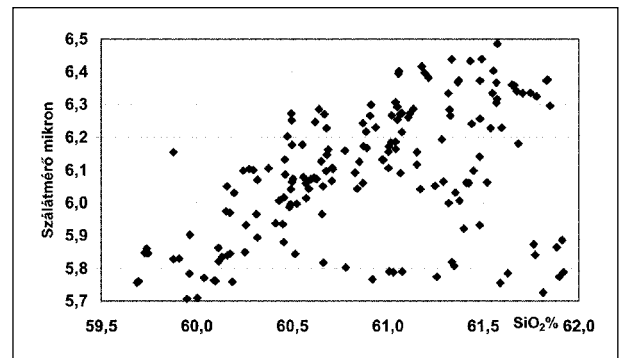
9. ábra. MgO és a szálátmérő kapcsolata  
MgO value fiber diameter



12. ábra. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> value fiber diameter



10. ábra. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> value fiber diameter



13. ábra. SiO<sub>2</sub> és a szálátmérő kapcsolata  
SiO<sub>2</sub> value fiber diameter

A MgO és a szálátmérő kapcsolata (9. ábra). A MgO és a szálátmérő között a CaO-hoz hasonlóan kevesebb tendencia fedezhető fel. A 3% alatti MgO tartományban kiugróan széles a szálátmérő szóródása, és 4% felett már jóval egyenletesebb képet mutat.

Az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata (10. ábra). Az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erősen befolyásolja a szálátmérőt. 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tartalomig drasztikusan csökkenti, majd kisebb ingadozásokkal stabilizálódik a hatása.

A B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata (11. ábra). A B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8% alatt csökkenti, majd stabilizálja a szálátmérő vastagságát. Hatása harmadfokú polinommal közelíthető, és a közelítés  $r^2 = 0,9298$  értékkel erős kapcsolatot mutat.

A Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és a szálátmérő kapcsolata (12. ábra). A Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is az erősen befolyásoló alkotók közé tartozik. 0,06% alatt stabilan alacsony szálátmérőt eredményez. A vastartalom emelkedésével gyors mértékben vastagodik a szál, és kisebb-nagyobb ingadozásokkal magasabb értéken állandósul. Az alacsony szálátmérőhöz 0,05% alatti Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> érték a célra vezető.

A SiO<sub>2</sub> és a szálátmérő kapcsolata (13. ábra). A SiO<sub>2</sub> és a szálátmérő között alig fedezhető fel tendencia. Az

alacsonyabb SiO<sub>2</sub> értékhez kisebb szálátmérő tartozik, majd az emelkedésével a szálátmérő-tartomány egyre szélesebb lesz.

## A viszkozitás szerepe

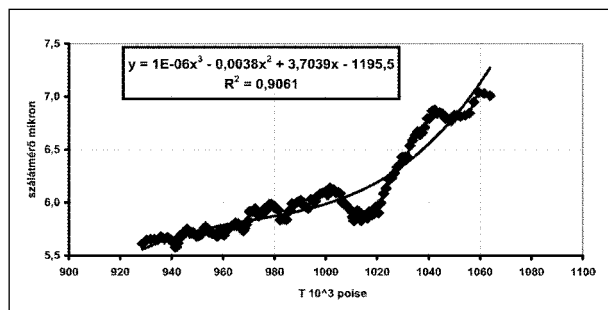
A viszkozitás a folyadék rétegek, esetünkben az üvegolvadék elmozdulásakor fellépő súrlódási erő. Egysége a Pa · s (pascal · másodperc), illetve a poise (1 poise = 0,1 Pa · s). Az üveg viszkozitása a hőmérséklet emelkedésekor csökken, ellenkező esetben növekszik.

Az irodalmi források, az elvégzett mérések és a gyakorlati tapasztalat is azt mutatja, hogy az üvegek oxidos összetételének változtatása erősen befolyásolja az üvegolvadék viszkozitását.

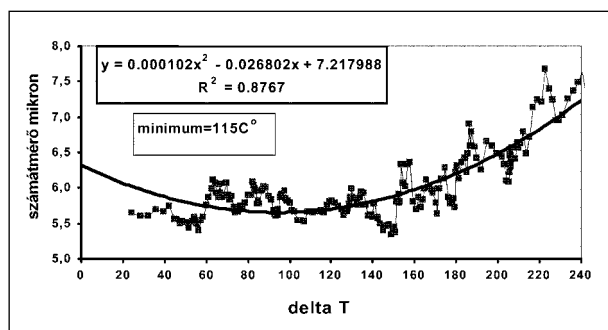
A különböző irodalmi források az üveg oxidos összetétele alapján egymástól eltérő összefüggéseket ajánlanak

A viszkozitást leíró összefüggés állandói  
Constants of viscosity equation

B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a	b	k
-0,060	0,296	0,001	-0,224	-0,048	-0,431	0,123	-2,490	24567	0,009	-25,551



14. ábra. A szálátmérő és 10<sup>3</sup> poise kapcsolata  
10<sup>3</sup> poise value fiber diameter



15. ábra. A szálátmérő és a ΔT kapcsolata  
ΔT value fiber diameter

a viszkozitás számítására, attól függően, hogy milyen oxidokat és milyen intervallumot dolgoztak fel. Általában a  $\eta_i = \sum C_i \cdot m_i + k$  alakú összefüggéseket ajánlják, ahol  $C_i$  az adott  $i$ -ik komponens együtthatója, az  $m_i$ -t, az adott oxidot általában tömegszázalékban adják meg.

A feldolgozott viszkozitásméréseket – ismételtlen megjegyzendő, hogy nem homogén adathalmazról van szó (lásd 4. táblázat) –  $\sum C_i \cdot m_i + a/T + b \cdot T + k$  alakú polinommal közelítettük. A közelítés ereje:  $r^2 = 0,857$ , azaz a széles alkotó oxidintervallum és a nem homogén adatok miatt csak tendenciák bemutatására alkalmas az összefüggés (5. táblázat).

A viszkozitást csökkentő oxidok a hatáserősség szerint: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > CaO > MgO > Na<sub>2</sub>O > B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A viszkozitást növelő oxidok a hatáserősség szerint: MgO > SiO<sub>2</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Ebből adódik, hogy a különböző üvegviszkozitás más-más szálátmérőt eredményez. Az üvegszál gyártásakor a szárazotárcaába jutó üveg kifolyik a palást több ezer furatán, és a centrifugális erő hatására megnyúlik. Az üveg a kidolgozási hőmérséklet-tartományban jól alakítható. A

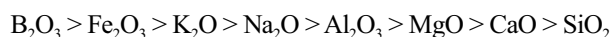
gyártás a 10<sup>3</sup> poise és az üveghossz ΔT hőmérsékleteivel (10<sup>4</sup> és 10<sup>7,65</sup> poise hőmérsékletei közötti különbség) jellemezhető. A 10<sup>3</sup> poise és az üveghossz ΔT hőmérsékleteket az ÉPÍTŐANYAG 2006/1. számában közölt módszeremmel határoztam meg.

A szálátmérő és 10<sup>3</sup> poise hőmérséklet kapcsolata (14. ábra). Az 1000 poise hőmérséklet és a szálátmérő között közel függvényszerű összefüggés van. A hőmérséklet növekedésével a szálátmérő eleinte kevéssé, majd egy helyi minimum után meredeken emelkedik. A tendencia könnyen megérthető, hiszen a viszonylag alacsonyabb hőmérsékleten is alakítható üvegszál hosszú ideig képes megnyúlni, így vékonyabbá válni.

A szálátmérő és a ΔT kapcsolata (15. ábra). Az üveghossz azt fejezi ki, hogy milyen hőmérséklet-tartományban alakítható az üveg. Az üveghossz egy minimum függvény szerint befolyásolja a szálátmérőt.

## Következtetések

Összességében megállapítható, hogy a hőszigetelő, szálás szigetelőanyagok hővezető képességét a testsűrűség mellett a szálméret is befolyásolja. A szálátmérő csökkentésével a testsűrűség jelentősen csökkenthető. Az egyes üvegalkotók különböző mértékben hatnak az üveg viszkozitására, így a kialakuló szálvastagságra. Ezek hatáscsökkenő sorrendje a következő:



Megjegyzendő, hogy a B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a szálméretcsökkentő hatások sorrendjében a viszkozitást változtató sorrenddel ellentétben itt az első helyen szerepel. Ez jól egybevág a B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> viszkozitást változtató tulajdonságával, hogy magas hőmérsékleten jelentősen csökkenti, illetve az alacsony hőmérsékleten cca. 15%-ig növeli, ettől nagyobb részarányánál viszont csökkenti az üveg viszkozitását.

Az 1000 poise hőmérsékletét minél alacsonyabb, az üveghossz, ΔT-t pedig az adott üvegolvasztási, szárazási technikától függő minimumértékre célszerű beállítani az alacsony szálátmérő, a jó hőszigetelő termék érdekében.

A téma fontosságát jelzi, hogy az interneten található, ezzel kapcsolatos, szabadalmilag levédett üvegösszetételek, módszerek száma többezres nagyságrendű.

**HIRDESSZEN AZ ÉPÍTŐANYAG FOLYÓIRATBAN!**